[制动开关]

63 kA电气制动开关的研究及工程应用

文/张震锋[1] 黄小凤[2] 张晓菁[1] 黄 炜[2] 陈 蕾[1] 徐 浩[2] 马 冲[1]
1. 西安西电开关电气有限公司；2. 南方电网调峰调频发电有限公司

通过对国内首套国产化的63 kA电气制动开关进行研究，叙述了电气制动开关的基本原理及工程应用情况。更好地运用电气制动开关设备，使抽水蓄能水电站科学合理的安全运行，符合我国应对气候变化提出的“碳达峰、碳中和”的目标以及大力发展绿色、低碳及环保型清洁新能源要求。

随着全球能源互联网概念的提出，我国正加快建设以特高压电网为骨干网架，各级电网协调发展的坚强智能电网。抽水蓄能电站以其灵活的运行方式、快速的响应速度，已成为我国智能电网建设的重要组成部分，在保障电力安全、推动新能源健康发展中发挥了至关重要的作用。但目前抽水蓄能占电源总装机比重仅为1.4%，不能满足新能源快速需求，未来我国抽水蓄能建设步伐还将进一步加快，发展前景十分广阔。

根据抽水蓄能电站的运行特点，每台发电机必须配置一台电气制动开关，它是在大型水力发电机组停机过程中，将机端短路的开关装置，利用同步电动机的电枢反应，在发电机的转子灭磁以后让定子三相短路，同时给转子线圈提供励磁电流，让其产生与惯性作用方向相反的制动力矩，迫使机组迅速停止转动，有利于发电机快速通过低转速区，减少推力瓦磨损，并且大大提高机组自动化水平，减少检修维护工作量，能够有效延长发电机的使用寿命。

近年来，随着抽水蓄能电站的快速发展，对适用于该类型电站的63 kA电气制动开关需求越来越迫切。目前国内尚无63 kA专门的水轮机电气制动开关装置，市场一直被少数几个国外企业垄断。国外生产电气制动开关的厂家有ABB公司、GE公司、SCDEM公司和AE POWER，ABB公司及GE公司采用SF_6断路器作为制动开关，SCDEM公司和AE POWER采用隔离开关作为制动开关。

为了打破国外公司在63 kA电气制动开关领域内的垄断地位，进一步推进重大装备国产化，加快自主创新的步伐，使得核心技术掌握在我们自己手里，全面提升公司抽水蓄能发电机系列成套以及成套设备整体打包的供货能力，为公司提供新的经济利润增长点，决定进行63 kA电气制动开关的研制。

产品主要技术参数

通过对市场和设计院的调研，充分考虑市场的覆盖性，结合绝缘水平、额定通流能力、制动电流、持续时间以及机械可靠性等几个方面的功能要求，确定产品主要技术参数见表1。

基金项目：中国南方电网有限责任公司重点科技项目：抽水蓄能机组成套开关设备关键技术研究及应用（STKJXM 20190198）

表1　产品主要参数

额定电压	24 kV
额定电流	8 000 A
制动电流/制动时间	18 000 A/10 min
额定短时耐受电流及时间	80 kA/3 s
额定峰值耐受电流	240 kA
额定绝缘水平（同时满足3 000 m高海拔要求）：	
额定短时工频耐受电压	65 kV
额定雷电冲击耐受电压	125 kV
额定负荷开、合电流/次数	18 kA/12次
机械寿命	20 000次

产品总体结构

电气制动开关成套设备由三极灭弧室、传动框架、弹簧操动机构、三相短接铜排及金属箱体等组成，其中三极灭弧室竖直安装在传动框架上；内部采用SF_6气体绝缘及灭弧，相与相之间采用空气绝缘；三极配用一台弹簧操动机构，可实现三相机械联动，整体结构简单、紧凑，如图1所示。

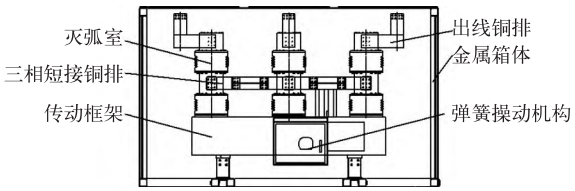

图1　电气制动开关外形简图

关键技术研究

1. 灭弧室结构设计

根据电气制动开关的实际工况，在停机开始时，发电机仍按额定转速或略低于额定转速旋转，发电机定子上有一定的残压，当短路开关合上时会产生跨越电弧冲击，出现残余短路电流，因此要求电气制动开关在选型时具有一定的负荷电流开合能力，对其电气可靠性提出了一定的要求。

根据上述工况，电气制动开关要求具有一定的短路开断能力，要求具有18 kA负荷电流开合能力；同时也需满足额定电流8 000 A、短时制动电流18 000 A/10 min的超大载流能力。在灭弧室结构设计时，勇于创新，打破传统的设计理念，设计了全新的双回路灭弧室结构，双回路具体是指弧回路与主回路，其中弧回路能够起到熄弧的作用；主回路主要承载超大电流的作用，二者作用完全分开，又相辅相成；其中弧回路配备了动静弧触头，压气缸及喷口等结构，与常规的隔离开关作为电气制动开关相比，具有更长的电气寿命；与以发电机断路器作为电气制动开关相比，具有经济性好、对机构的操作功要求更小及灭弧室整体结构简单、紧凑的特点，如图2所示。

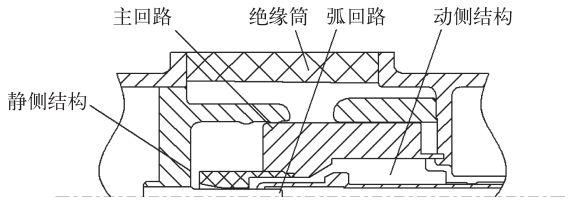

图2　灭弧室简图

为了能够保证电气制动开关的电气可靠性，进行了动态电场分步计算，采用等步长计算，校核制动开关在合闸过程中的电场变化及对起弧点进行了判定，确保动触头系统运动过程中动静弧触头结构的弧回路可靠引弧，避免主触头起弧，能够有效提高电气制动开关的电气使用寿命，如图3所示。

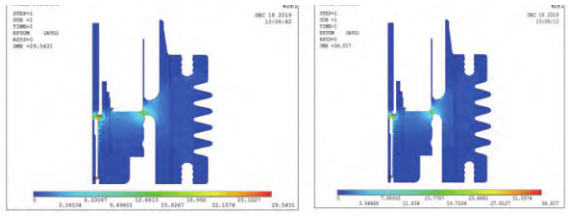

图3　动态电场分布仿真计算云图

2. 主导电回路结构设计

根据抽水蓄能电站开关设备的需求，要求电气制动开关设备额定电压低，载流能力强，且由于空间限制，整体尺寸不能太大，否则满足不了抽蓄电站要求，因此为了缩小单极结构尺寸，灭弧室内绝缘采用SF_6气体绝缘，同时使金属壳体既作为承压零件，也作为主导回路；相与相之间采用空气绝缘，有效地利用相间距离以缩小整体结构尺寸；整体采用SF_6和空气混合绝缘、散热的布置方式，能够有效降低SF_6气体的使用以及排放，满足产品小型化、节能、环保及绿色型电力产品的发展需求。

在进行具体结构设计时，为了能够进一步缩小整体结构尺寸，同时满足20 000次机械操作试验的磨损要求，电接触部分采用一种创新型结构，它具有结构简单、加工方便、安装空间小、载流能力

强、机械可靠性高及电阻稳定性强等特点，能够满足大电流载流的要求。

3. 操动机构及传动结构设计

电气制动开关根据其工况，随发电机组的频繁操作，起动次数多，特别是用户对其提出了20 000次机械寿命的要求，对于电气制动开关要求具有非常高的机械可靠性。通过对其本体、传动部分、操动机构及相匹配灭弧室的特性关系等进行机械可靠性研究，在设计过程中遵循“成熟即稳定、简单即可靠”的原则，灭弧室采用现有成熟的结构；传动部分选用成熟的四连杆结构；通过对灭弧室运动件等效质量计算，分闸时压气缸的压气消耗功以及分合闸操作过程中的操作功等的等效计算，选用我公司目前成熟的弹簧操动机构即可满足设计要求，其传动系统如图4所示。

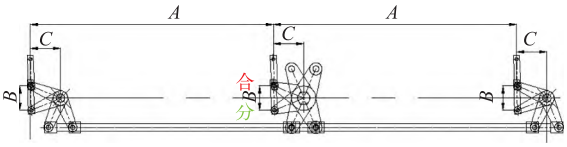

图4　传动系统结构简图

根据电气制动开关频繁操作以及用户提出20 000次机械操作次数的要求，通过对传动部分结构进行特性模拟以及关键零件受力分析，保证所有零部件均满足强度要求，如图5所示。

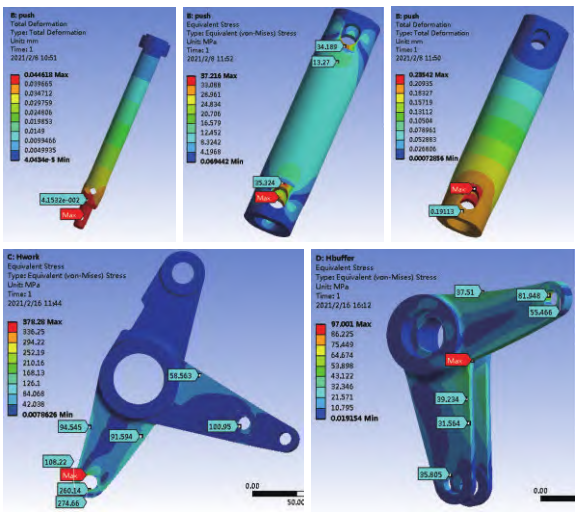

图5　关键零部件受力分析

型式试验

该产品严格按照国标GB/T 11022、GB/T 14824及用户技术文件等要求，在国家高压电器质量监督检验中心XIHARI完成了全套型式试验项目，关键试验如下。

1. 绝缘试验

绝缘试验采用最严苛的条件进行，充分验证产品的每一种工况，顺利完成了标准要求的绝缘试验以及3 000 m高海拔修正试验；在高海拔修正绝缘试验中未增加气压的情况下，除外绝缘修正外，还对断口绝缘参数进行了修正，断口工频耐受电压标准要求由80 kV修正到102 kV；雷电冲击耐受电压值由145 kV修正到185 kV，即内外绝缘均满足3 000 m高海拔修正试验要求；绝缘试验完成后在1.2U_r下进行了局部放电试验，整体局放值不大于5 pC，试验形态如图6所示。

图6　绝缘试验形态简图

2. 额定短时耐受电流和峰值耐受电流试验

项目研发初期时，额定短时耐受电流和峰值耐受电流参数要求63 kA（3 s）/190 kA；在项目研发过程中，部分抽蓄用户提出了额定短时耐受电流为80 kA（3 s）、额定峰值耐受电流为240 kA的特殊参数要求，通过对其主导回路进行充分计算及核对，认为产品性能完全能够满足用户的最新要求，型式试验时直接将参数提升，一次性通过了80 kA（3 s）/240 kA的型式试验，试验后电阻及特性均符合要求，符合产品研发与市场导向相结合，使研发的产品能够快速融入市场，能够更好地为用户提供高性能参数的产品，试验形态如图7所示。

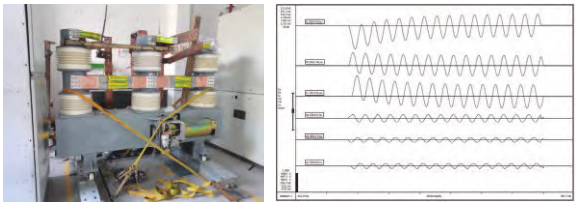

图7　动热稳定试验及试验示波简图

3. 温升试验

温升试验带箱体进行，试验时未增加任何散热通道及强制风冷等措施的情况下，通过短时制动电流/制动时间18 000 A/20 min，长期温升试验8 000 A，试验形态如图8所示。

图8　温升试验形态简图

4. 额定负荷电流开合试验

为了确保所有开合条件下的满意操作，采用三相进行试验，负荷开断电流18 kA，试验次数12次，试验解体后各零件烧蚀正常，如图9所示。

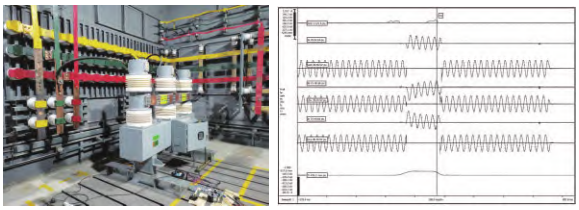

图9　负荷电流开合试验及示波简图

5. 机械寿命试验

产品在进行机械寿命试验过程中，仅对弹簧操动机构进行了简单的润滑，其他部分未进行任何操作，一次性通过了20 000次机械寿命试验，且试验后对产品进行了工频验证，顺利通过，试验形态如图10所示。

图10　机械寿命试验照片

2021年7月，63 kA电气制动开关项目通过了集团公司新产品技术鉴定及项目验收，产品为三相分箱式结构，采用SF_6作为内绝缘和灭弧介质，相与相之间采用空气绝缘，开关均封闭在同一个金属箱体内，开关配弹簧操动机构，三相机械联动，整体结构简单、布置紧凑，具有载流能力强、可靠性高及绝缘水平高等特点，认为该产品拥有自主知识产权，填补了国内空白，其综合技术性能处于国际先进水平。

目标市场及工程应用

产品研发成功后，主要目标市场是国内抽水蓄能发电机系列成套及成套设备整体打包的用户。满足重大开关装备国产化的要求，也可应用于现有国外电气制动开关设备的替换检修。为用户提供更多的选择，节约了电站建设成本。

结束语

综上所述，未来随着越来越多抽水蓄能电站的建立，电气制动技术必然会发挥更大的效用。如何将电气制动技术科学合理地运用到水电厂中，需要不断增加对电气制动技术的研究，提高电气制动技术的水平，不断完善电气制动技术，增加制动的稳定性，最大限度地发挥电气制动技术的作用，为水电厂电气设备的稳定运行提供保障。最终通过对电气制动开关核心技术的研究，加快抽水蓄能电站开发建设，全力推动能源低碳转型，为构建以新能源为主体的新型电力系统，助力实现碳达峰、碳中和目标作出更大贡献。EA

（收稿日期：2022-06-17）

参考文献

[1] 高压交流发电机断路器：GB/T 14824—2008[S].
[2] 高压交流开关设备的控制设备标准的共用技术要求：GB/T 11022—2020[S].
[3] 林伊邦，谢彬．探讨电气制动技术在高水头水电厂的应用[J]．电源技术应用，2013(8)：541-545.
[4] 谭娟，杨艳，刘光权．大型水轮发电机组电气制动技术在三峡水电站的应用[J]．水电自动化与大坝监测，2012(12)：34-37.
[5] 杨世强，何信林，王团结，等．大型发电机转子绕组匝间短路故障诊断研究与应用[J]．电气应用，2021，40(9)：30-34,40.